

مطالعه ژئوشیمی پولیه کارستی حرکت (شمال شرق شهر مشهد)

مجتبی حیدری‌زاد^{۱*}، سیدعلی آقایی^۲ و مهدی عبداللهی منصورخانی^۱

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی رسوب شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

* mojtabaheydarizad@yahoo.com

دریافت: ۹۱/۹/۲۲ پذیرش: ۹۲/۳/۲۱

چکیده

پولیه حرکت یکی از بارزترین پدیده‌های کارست سطحی در استان خراسان رضوی است که در ۵۵ کیلومتری شمال شرق شهر مشهد قرار دارد. این پولیه عمدتاً از واحدهای کربناته سازند مزدوران (Jmz_1 , Jmz_2 & Jmz_3) تشکیل شده است. علاوه بر آن، واحدهای تبخیری سازند شوربچه در شمال پولیه و هم‌چنین رسوبات متعلق به کواترنری در منطقه وجود دارد. در این مطالعه ۲۸ نمونه از واحدهای کربناته سازند مزدوران و هم‌چنین ۵ نمونه از رسوبات کواترنری برداشت شده و میزان عناصر Ca, Mg, Sr, Mn و Fe در این نمونه‌ها اندازه‌گیری گردیده است. در ادامه نقشه پراکندگی این عناصر در منطقه تهیه و هم‌چنین فرآیند تحلیل عاملی بر روی آن‌ها صورت گرفته است. هدف مطالعات تشخیص عوامل موثر و کنترل کننده ژئوشیمی پولیه حرکت و هم‌چنین مکان‌های مستعد برای تجمع عناصر اقتصادی در پولیه با توجه به ژئومورفولوژی خاص آن بوده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دهنده این موضوع است که پدیده دیاژنز متوریک با توجه به افزایش Mn و Fe و کاهش Sr و نسبت Sr/Mn مهم‌ترین عامل کنترل کننده ژئوشیمی پولیه حرکت است. افزایش میزان Fe و Mn در نمونه‌های کربناته بر اثر تأثیر فرآیندهای دیاژنتیکی در یک محیط نسبتاً احیایی تا کم اکسیژن صورت گرفته است. هم‌چنین افزایش میزان این دو عنصر و کاهش میزان Sr در نمونه‌ها می‌تواند در ارتباط با ضریب توزیع این عناصر و هم‌چنین تمرکز آن‌ها در محلول‌های دیاژنری باشد. از طرفی، مطالعه و رسم نقشه‌های پراکندگی عناصر فوق به همراه نقشه نشانه‌های عاملی (Factor Score Map) نشان دهنده این مسئله است که میزان عنصر Fe در پایین دست پولیه حرکت افزایش چشمگیری می‌یابد و به ۷۵۰۰ ppm می‌رسد و این احتمال را به وجود می‌آورد که رسوبات آبرفتی در پایین دست پولیه با توجه به شیب کم آن نسبت به سایر بخش‌های پولیه می‌تواند به عنوان تله‌های ژئوشیمیایی برای عناصری باشند که در بالادست پولیه انحلال یافته است.

واژه‌های کلیدی: ژئوشیمی، پولیه کارستی، واحدهای آهکی کارستی شونده، سازند مزدوران، حرکت، مشهد

مقدمه

یک طرف آن چشمه و در طرف دیگر آن فروچاله^۲ وجود داشته و یک شیب بسیار ملایم از سمت چشمه‌ها به سمت فروچاله وجود دارد که معمولاً توسط فرآیندهای تکتونیک ایجاد می‌شوند. بررسی ژئوشیمیایی پولیه‌ها و پهنه‌بندی عناصر شیمیایی در آن‌ها با توجه به ژئومورفولوژی خاص واحدهای سنگ‌شناسی موجود در پولیه‌ها می‌تواند تله‌های ژئوشیمیایی بسیار خوبی برای برخی عناصر شیمیایی کمیاب و اقتصادی از جمله Fe, Mn, Zn و Ni باشد، که از این جهت دارای اهمیت بسیار بالایی است [۱۴]. تا کنون مطالعات جامعی در بررسی ژئوشیمیایی پولیه‌ها به صورت مجزا صورت نگرفته و از معدود مطالعاتی که بر روی ژئوشیمی پولیه‌های کارستی صورت گرفته می‌توان به

سازندهای کارستی شونده، غالباً از واحدهای کربناته و در برخی مواقع از سازندهای تبخیری تشکیل شده‌اند و حدود ۲۰٪ از سطح زمین را به خود اختصاص داده‌اند [۱۰]. بر روی این مناطق حدود ۲۵٪ از جمعیت کره زمین زندگی می‌کنند و یا آب مورد نیاز خود را از آن تامین می‌نمایند. حدود ۱۱٪ از سطح کل کشور توسط سازندهای کارستی شونده پوشیده شده است [۴]. مطالعه فرآیند کارستی-شدن با توجه به تأثیری که این فرآیند بر واحدهای آهکی دارد به دو دسته پدیده‌های کارست سطحی و پدیده‌های کارست عمقی تقسیم می‌شوند. پولیه‌ها^۱ جز پدیده‌های کارست سطحی هستند و اغلب به فروافتادگی‌های بزرگ درون واحدهای آهکی کارستی گفته می‌شوند که غالباً در

² Sink hole

¹ Polje

خاکی است (شکل ۱). پولیه حرکت یک پولیه مرتفع بوده و حداقل ارتفاع آن ۱۷۲۰ متر در خروجی پولیه و حداکثر ارتفاع آن ۲۵۸۵ متر و در قسمت شمال شرقی است. محل مورد مطالعه دارای آب و هوای سرد و نسبتاً خشک بوده و حداقل دمای هوا در فصل زمستان به ۱۴- درجه سانتی-گراد و حداکثر دما در فصل تابستان به ۲۸ درجه سانتی-گراد می‌رسد. میزان بارندگی بین ۳۱۲ تا ۴۵۰ میلی‌متر در سال متغیر بوده و اکثر بارندگی در فصل زمستان و اوایل فصل بهار رخ می‌دهد که به دلیل ارتفاع بالای منطقه این بارندگی‌ها بیشتر به صورت برف می‌باشد. پدیده‌های کارست عمقی در منطقه مشاهده نشده است ولی از مهم‌ترین پدیده‌های کارست سطحی در واحدهای کربناته موجود در پولیه حرکت، کارن‌های شیاری (Cleft-Karren) و کارن‌های میز مانند (Karren tish) است. از نظر زمین‌شناسی اطراف پولیه حرکت بیشتر از واحدهای مختلف (J_{mz3} , J_{mz1} , J_{mz2}) سازند مزدوران و واحدهای ماسه‌سنگی (Ksh) سازند شورپیجه تشکیل شده است (شکل ۲). واحد J_{mz1} سازند مزدوران بیشتر در قسمت شرقی پولیه حرکت رخنمون دارد و بیش‌تر از سنگ آهک دولومیتی سبتر و ضخیم لایه تشکیل شده است که سن آکسفوردین دارند. واحد J_{mz2} سازند مزدوران با رخنمون کمتر نسبت به واحدهای دیگر سازند مزدوران در منطقه در قسمت شمالی پولیه و به مقدار کمتر در قسمت مرکزی پولیه رخنمون دارد و بیش‌تر از جنس سنگ آهک‌های حاوی واحدهای شیلی با سن تقریبی آکسفوردین-کالدونین است. واحد J_{mz3} سازند مزدوران که نسبت به واحدهای دیگر این سازند قسمت بیش‌تری از مساحت پولیه را به خود اختصاص داده است بیش‌تر در قسمت غربی و شمال غربی حوضه رخنمون دارد و از جنس سنگ آهک‌های اوولیتی است که دارای سن کیمریجین می‌باشد. واحدهای ماسه‌سنگی سازند شورپیجه (K_{sh}) نیز در منطقه در قسمت شمالی پولیه و در بالادست روستای حرکت قرار دارد و از جنس ماسه سنگ‌های دانه-ریز سرخ تا بنفش رنگ می‌باشد که دارای بین لایه‌هایی از واحدهای تبخیری به ویژه ژپس است که سن تقریبی آن نئوکومین است [۳]. علاوه بر این رسوبات کواترنری متعلق به پلیوکواترنری (Q_{11}) و آبرفت‌های عهد حاضر (Q_{12}) نیز قسمت میانی پولیه را پوشانده‌اند که بیش‌تر از جنس رسوبات ماسه‌سنگی دانه‌ریز هستند. پولیه حرکت از لحاظ

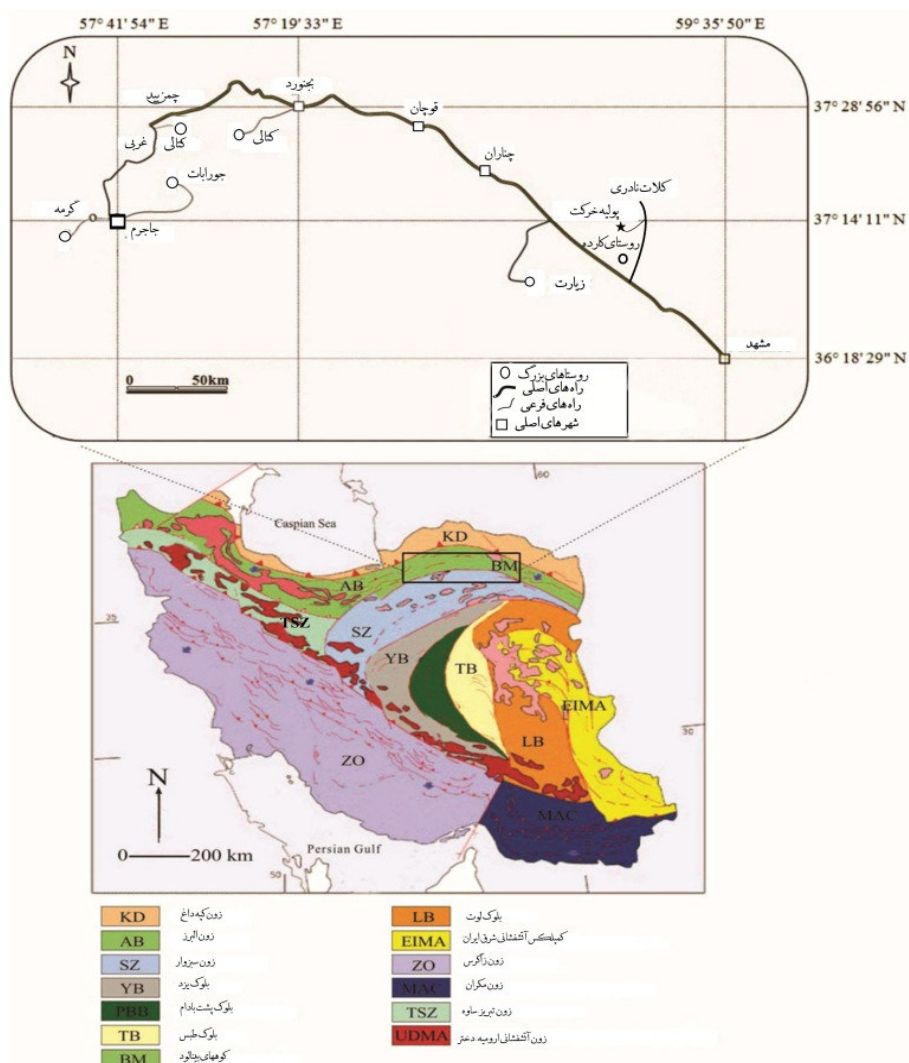
مطالعه‌ای که توسط پروهیک (Prohic) و همکاران انجام شده است اشاره نمود. نامبرده در سال ۱۹۹۸ با مطالعه ۴۰ نمونه در پولیه Sinjsko در کشور کرواسی و اندازه-گیری میزان عناصر Fe, Mn Sr, Ba, Zn, Ca, Mg, Ni, Na و اکسیدهای Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO, MgO در آن‌ها، با استفاده از تکنیک آماری تحلیل عاملی و تهیه نقشه نشانه‌های عاملی (Factor scores map)، نحوه رسوب-گذاری و پراکنش عناصر و اکسیدهای فوق را در مطالعه مکان‌های دارای پتانسیل‌های اقتصادی مورد بررسی قرار داد. از دیگر مطالعاتی که بر روی ژئوشیمی مناطق آهکی صورت گرفته است و هدف غالب آن‌ها بررسی ژئوشیمی واحدهای کربناته برای بررسی محیط رسوبی گذشته بوده، می‌توان به وائل (Wael) و همکاران ۲۰۰۸ اشاره نمود [۱۸]. نامبردگان با بررسی ژئومورفولوژی و ژئوشیمی کارست در ایتالیا و فرانسه به انتشار جدیدترین یافته‌های خود در زمینه پتانسیل‌یابی عناصر فرعی در محیط‌های کارستی پرداخته‌اند. در سطح داخلی نیز مطالعات گوناگونی بر روی ژئوشیمی محیط کارستی صورت گرفته که از جامع‌ترین آن‌ها می‌توان به ایمانی اشاره نمود [۲]. نامبرده با مطالعه توزیع عناصر Fe, Mn, Zn و Ni در نمونه-های کربناته سازند الیکا در منطقه مهدی‌آباد سمنان نقش فرآیند کارستی‌شدن بر میزان توزیع عناصر فوق را در منطقه مورد بررسی قرار داده و میزان انحلال این کانی‌ها را در آب چشمه‌های منطقه مطالعه کرده است. هدف از این مطالعه ارزیابی عوامل موثر بر ژئوشیمی واحدهای مورد مطالعه در پولیه حرکت با استفاده از انجام تکنیک آماری تحلیل عاملی بر داده‌های عناصر شیمیایی Mg, Ca, Sr, Mn و Fe بر نمونه‌های جمع‌آوری شده در پولیه و هم-چنین رسم نقشه پراکنش عناصر فوق در پولیه برای تعیین مکان‌های داری پتانسیل‌های اقتصادی سطحی می-باشد.

ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی

پولیه حرکت در مختصات طول $59^{\circ} 26'$ تا $59^{\circ} 35'$ و عرض $48^{\circ} 36'$ تا $48^{\circ} 58'$ قرار گرفته است که در ۵۵ کیلومتری شمال شرقی شهر مشهد و در بالادست سد کارده قرار دارد. دسترسی به این پولیه تنها از طریق جاده آسفالت‌شده-کلات نادری مقدور بوده و قسمت عمده جاده منتهی به این پولیه پس از روستای کارده به صورت

دیده می‌شود. از طرفی درزه‌ها و شکستگی‌های منطقه دارای روند عمومی N135 بوده و تمرکز آن‌ها بیش‌تر در واحد J_{mz1} سازند مزدوران است.

تکتونیک بسیار فعال بوده و گسل‌های عادی متعدد با روند عمومی شمال شرقی- جنوب غربی عمود بر روند چین‌خوردگی کپه‌داغ (شمال غربی- جنوب شرقی) در آن



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های منتهی به آن

منطقه (نمونه‌برداری با حفاری قشر رویی خاک و از عمق ۵۰ سانتی‌متری صورت گرفته است). نمونه‌های متعلق به رسوبات پس از جمع‌آوری در داخل کوره با دمای حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و برای مدت ۲۴ ساعت خشک شده‌اند. پس از خارج شدن رطوبت از نمونه‌های خاک و از بین رفتن مواد آلی آن، رسوبات از داخل الک ۰/۰۶۲ میلی‌متر عبور داده شده و به همراه نمونه‌های پودر شده لیتولوژی واحدهای کربناته سازند مزدوران به آزمایشگاه شرکت خاک پویان پارس‌یان انتقال داده شدند. در آزمایشگاه شرکت در ابتدا pH، EC و SP نمونه‌های خاک

مواد و روش‌ها

۱- نمونه‌برداری و آنالیز داده‌ها

در طی این مطالعه ۳۳ نمونه از پولیه حرکت برداشته شده است که ۲۸ نمونه متعلق به واحدهای آهکی سازند مزدوران و ۵ نمونه متعلق به رسوبات و آبرفت‌های عهد حاضر است. نمونه‌برداری از واحدهای مورد مطالعه و تعیین مکان این نمونه‌برداری‌ها با دقت تمام صورت گرفته است که هرگونه تغییرات ژئوشیمیایی را تحت تاثیر تغییر واحدهای سنگ‌شناسی و توزیع درزه‌ها و گسل‌ها نمایش دهد. نمونه‌برداری از واحدهای سنگی و رسوبات موجود در

در این مطالعه از روش (R-mode) استفاده شده است که در آن فاکتورهایی که نشان دهنده آشکارترین روش برای نمایش هر عامل مستقل (عنصر) در هر نقطه مشاهده (مکان نمونه‌برداری) هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تعیین تعداد فاکتورها، دو روش Kaiser criterion و Scree Plot به کار گرفته می‌شود. در روش Kaiser criterion فاکتورهایی با عدد eigenvalue بالاتر از ۱ انتخاب می‌شوند در حالی که در روش Scree Plot داده‌هایی که برآمدگی نمودار Scree را نشان می‌دهند انتخاب می‌شوند. جدول (۲) عدد eigenvalue فاکتورهای مختلف در روش Kaiser criterion را در تعیین تعداد فاکتورها مورد بررسی در پولیه حرکت نمایش می‌دهد که بر اساس این روش‌ها ۲ فاکتور انتخاب می‌شود. از طرفی نقشه پراکنش میزان عناصر شیمیایی مورد مطالعه در منطقه توسط نرم افزار Arc Gis نسخه شماره ۱۰ و با استفاده از روش درون‌یابی IDW با توان ۲ و ۳ و روش کریجینگ رسم شده است. لازم به ذکر است که از میان روش‌های درون‌یابی مختلف روش‌های فوق بیش‌ترین تطابق را با واقعیت داشته و کمترین اختلاف را با نقاط کنترل^۱ بر روی سطح زمین نشان می‌دهند. در نهایت با استفاده از Multivariate Extension در نرم‌افزار Arc GIS و در قسمت Principle component نقشه فاکتورهای عاملی داده‌های عناصر ژئوشیمیایی برای پولیه حرکت رسم شده است. بر طبق نظر [۹] رسم نقشه‌های ژئوشیمیایی بر پایه فرآیند تحلیل عاملی نشان دهنده نوع خاصی از توزیع داده‌ها و آشکارسازی پدیده‌ها ژئوشیمیایی محلی خواهد بود که با مطالعه مستقیم توزیع پراکنش عناصر شیمیایی قابل بررسی نیست.

مورد بررسی قرار گرفته و سپس میزان عناصر Mg, Ca, Sr, Mn و Fe در نمونه‌های مورد مطالعه لیتولوژی و رسوبات توسط دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu A.A. 670 اندازه‌گیری شده است.

۲- مطالعات آماری و نرم‌افزارهای به کار گرفته شده در تحقیق

مطالعات آماری بخش مهمی از این تحقیق را تشکیل می‌دهد به نحوی که فرآیند آماری تحلیل عاملی (Factor analysis) پایه اصلی این مطالعه در بررسی پراکنش داده‌های عناصر شیمیایی و هم‌چنین تهیه نقشه نشانه‌های عاملی (Factor Score map) می‌باشد که در نرم‌افزار SPSS نسخه شماره ۱۵ صورت گرفته است. فرآیند تحلیل عاملی دارای ۳ پارامتر است که به ترتیب شامل تهیه ماتریس همبستگی از تمامی متغیرها، استخراج عامل‌ها و تفسیر نتایج است [۹]. یکی از مشکلات اساسی در فرآیند تحلیل عاملی تعیین تعداد فاکتورهای مورد بررسی است. اساس ماتریس همبستگی، ضریب همبستگی پیرسون بوده که بر طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

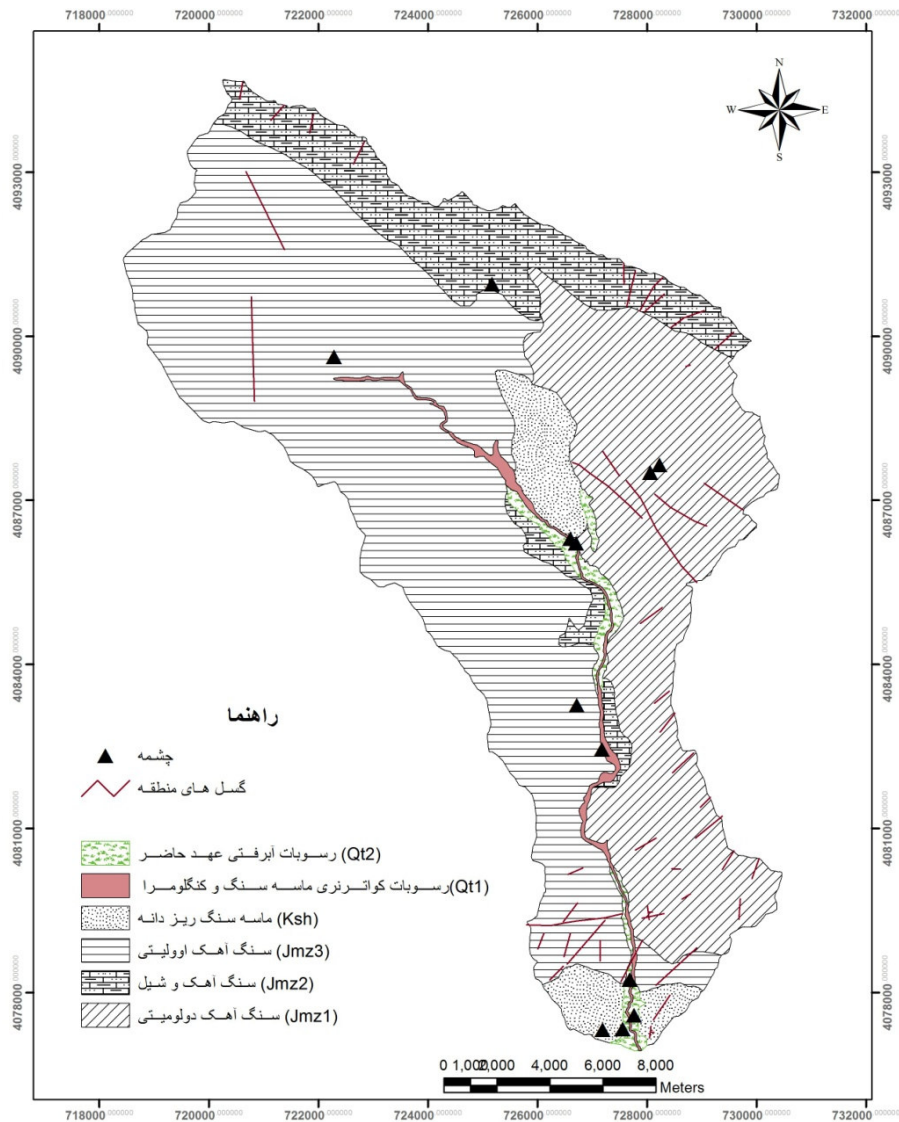
$$R = \frac{\sum(x-x^*)(y-y^*)}{(n-1)S_1S_2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن؛ n، تعداد متغیرها، S_1 و S_2 انحراف از معیار هریک از متغیرها، x و y مقدار هر کدام از پارامترها و x^* و y^* میانگین ریاضی هر کدام از متغیرها را نمایش می‌دهد. جدول (۱) ماتریس همبستگی پیرسون را برای نمونه‌های مورد مطالعه نمایش می‌دهد. فرآیند تحلیل عاملی آشکارسازی رابطه بین داده‌ها است که می‌تواند به ۲ صورت (R-mode) که در آن رابطه بین متغیرها مورد بررسی قرار می‌گیرد و یا (Q-mode) که رابطه بین نمونه‌ها بررسی می‌شود، انجام گیرد [۱۴].

جدول ۱. ماتریس همبستگی پیرسون داده‌های ژئوشیمیایی مورد مطالعه.

پارامتر	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Sr/Mn
Ca	۱/۰۰	-۰/۶۵	۰/۳۱	-۰/۷۶	-۰/۶۵	۰/۱۳
Mg	-۰/۶۵	۱/۰۰	-۰/۴۹	۰/۸۸	۰/۹۱	-۰/۷۲
Sr	۰/۳۱	-۰/۴۹	۱/۰۰	-۰/۳۶	-۰/۳۲	۰/۵۹
Fe	-۰/۷۶	۰/۸۸	-۰/۳۶	۱/۰۰	۰/۷۸	-۰/۵۱
Mn	-۰/۶۵	۰/۹۱	-۰/۳۲	۰/۷۸	۱/۰۰	-۰/۵۷
Sr/Mn	۰/۱۳	-۰/۷۲	۰/۵۹	-۰/۵۱	-۰/۵۷	۱/۰۰

^۱ - ۱۱ نمونه از ۳۳ نمونه مورد مطالعه بر روی نقشه‌های پراکنش عناصر شیمیایی به عنوان نقاط کنترل انتخاب شده‌اند.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی و چشمه‌های موجود در پولیه خرت.

جدول ۲. عدد eigenvalue در نمونه‌های مورد مطالعه.

فکتور	Eigenvalue	واریانس %	واریانس جمعی %
۱	۳/۹۸	۶۶/۳۹	۶۶/۳۹
۲	۱/۰۷	۱۷/۹۵	۸۴/۳۵
۳	۰/۶۰	۱۰/۰۶	۹۴/۴۲
۴	۰/۲۰	۳/۳۵	۹۷/۷۹
۵	۰/۰۹۸	۱/۶۳	۹۹/۴۱
۶	۰/۰۳۵	۰/۵۹	۱۰۰

بحث

در جدول (۳)، میزان عناصر شیمیایی (Ca, Mg, Fe, Mn, Sr) و نسبت (Sr/Mn) در نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. میزان عنصر کلسیم در نمونه‌های مورد مطالعه بین ۱۲۰/۰۰۰ تا ۳۹۰/۰۰۰ پی‌پی‌ام متغیر بوده و متوسط آن در نمونه‌ها ۲۴۸/۸۹۷ پی‌پی‌ام است. با توجه به (شکل ۳-الف) توزیع عنصر Ca در نمونه‌های مورد مطالعه بسیار متغیر بوده است و در قسمت شمالی پولیه جایی که واحد J_{mz2} سازند مزدوران رخمون دارد میزان این عنصر بالا است ولی با تبدیل شدن این واحد به J_{mz1} و J_{mz3} در این بخش از پولیه حرکت میزان عنصر Ca کاهش می‌یابد به نحوی که در بخش‌های میانی حوضه به حداقل میزان خود می‌رسد. میزان عنصر Ca در خروجی پولیه و در رسوبات Qt افزایش می‌یابد که دلیل آن تجمع Ca کربناته انحلال یافته متعلق به واحدهای کربناته سازند مزدوران و کلسیم غیر کربناته انحلال یافته متعلق به ماسه‌سنگ شوربچه در پایین دست پولیه حرکت است. میزان عنصر منیزیم یکی دیگر از عناصری که در واحدهای کربناته به وفور یافت می‌شود بین ۱/۹۰۰ تا ۸/۵۰۰ پی‌پی‌ام متغیر بوده و متوسط آن ۳/۷۱۸ پی‌پی‌ام است. پراکنش عنصر Mg (شکل ۳-ب) در قسمت شرقی و شمال شرقی حوضه که واحد J_{mz1} سازند مزدوران و قسمتی از واحد J_{mz2} رخمون دارد، بالاتر است. بالاتر بودن میزان Mg در این بخش از پولیه حرکت مربوط به حضور واحدهای آهکی و آهکی دولومیتی در واحد J_{mz2} سازند مزدوران است. در رخساره‌های مرتبط با فرآیند کارستی‌شدن، تخلیه شدید منیزیم در کربنات‌ها بیانگر واکنش آب/سنگ در برگزیده آب‌های جوی با مقدار پایین منیزیم است [۷] و تشکیل رگچه‌های کلسیتی با مقدار پایین منیزیم در حفرات ایجاد شده از انحلال دولومیکرایت‌ها بیانگر این توزیع کم منیزیم در نمونه‌های کارستی شده است. میزان عنصر Sr در نمونه‌های مورد مطالعه بین ۱۰۰ تا ۵۷۵ پی‌پی‌ام متغیر بوده و متوسط آن در نمونه‌های مورد مطالعه ۲۵۴ پی‌پی‌ام است. مقدار Sr در نمونه‌های کربناته بستگی زیادی به کانی‌شناسی دارد به نحوی که مقدار Sr با افزایش کانی‌شناسی افزایش می‌یابد [۱]. مقدار Sr در نمونه‌های مورد مطالعه بسیار کمتر از نمونه‌های عهد حاضر است که دلیل آن کاهش میزان Sr در طی تأثیر فرآیندهای دیاژنتیکی می-

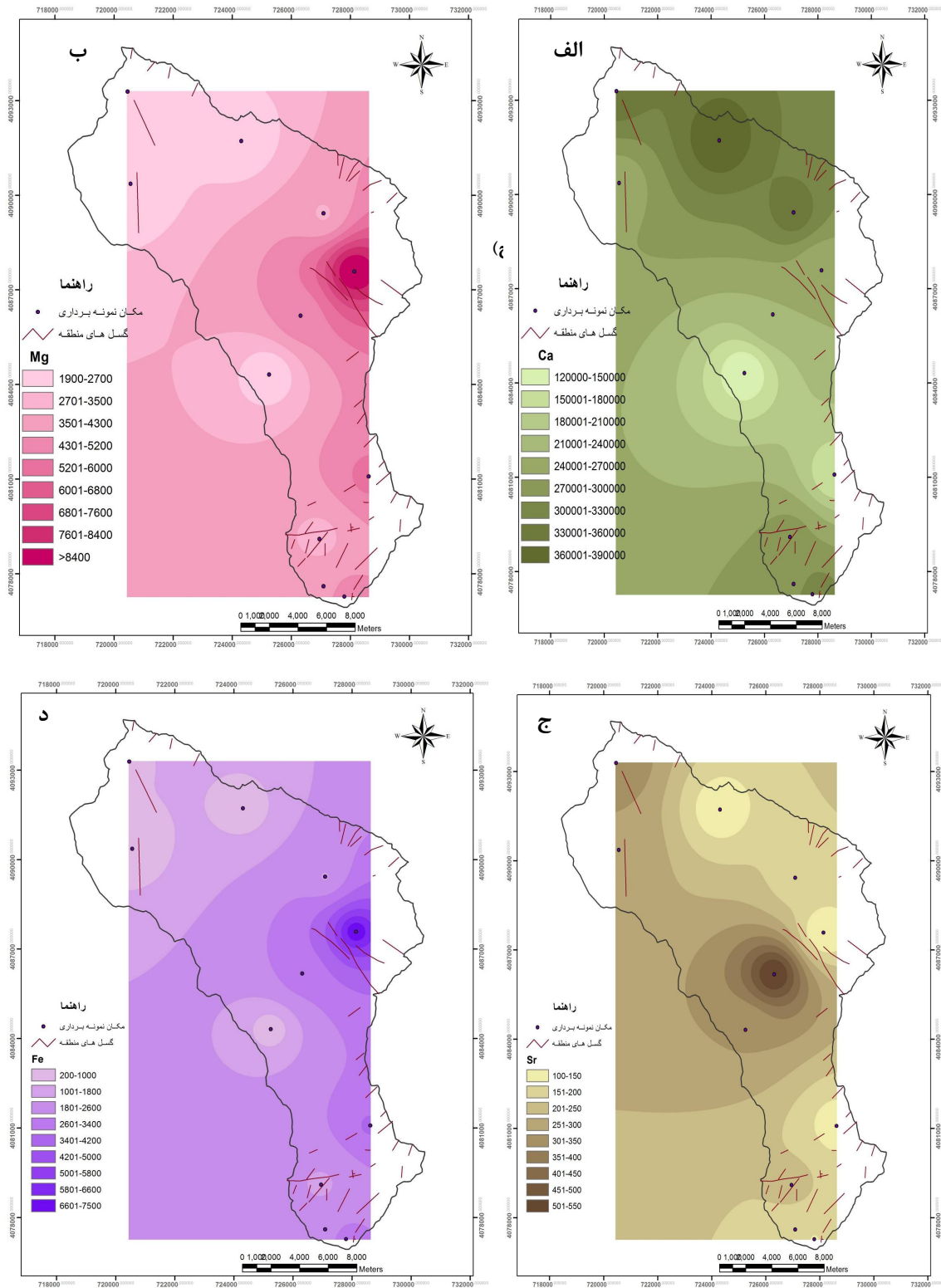
باشد. میزان Sr در کلسیت‌هایی که تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنتیک قرار گرفته است بستگی به تمرکز این عنصر در محلول‌های دیاژنتیک دارد. از آن‌جا که تمرکز عنصر Sr در محلول‌های دیاژنتیک پایین است بنابراین کلسیت دیاژنتیک میزان Sr پایینی دارد [۱]. همچنین تبدیل آراگونیت به کلسیت در طی زمان و تأثیر فرآیندهای دیاژنتیکی به ویژه تدفین و تمرکز پائین Sr در آب‌های ژوراسیک نسبت به عهد حاضر می‌تواند باعث کاهش Sr در این سنگ آهک‌ها شده باشد. آراگونیت قابلیت نگهداری یون‌های با شعاع یونی بالا مانند Sr^{2+} را دارد و اگر آراگونیت در طی دیاژنز به کلسیت تبدیل شود میزان استرنسیم در آن کاهش خواهد یافت. به علاوه پراکنش عنصر Sr در پولیه حرکت (شکل ۳-ج) می‌تواند در ارتباط با تراکم درزه‌ها و شکستگی‌ها در واحدهای کربناته سازند مزدوران باشد به طوری که در واحد J_{mz1} و J_{mz2} این سازند که تراکم درزه‌ها و گسل‌ها بالاتر است، میزان Sr کمتر از واحد J_{mz3} است که مربوط به تماس بیش‌تر آب-های جوی با واحدهای کربناته و نسبت بیش‌تر کلسیت دیاژنتیک در واحدها J_{mz1} و J_{mz2} نسبت به واحد J_{mz3} است. از طرفی مقدار عنصر Fe در نمونه‌های مورد مطالعه بین ۲۳۵ تا ۷/۵۰۰ پی‌پی‌ام متغیر و متوسط میزان آن در نمونه‌های مورد مطالعه ۲/۸۴۱ پی‌پی‌ام است. پراکنش عنصر Fe در پولیه حرکت (شکل ۳-د) به این صورت است که میزان این عنصر در جنوب پولیه که از رسوبات عهد حاضر پوشیده شده و شرق پولیه حرکت که از واحد J_{mz1} سازند مزدوران پوشیده شده بالاتر از قسمت‌های دیگر پولیه است. علت بالاتر بودن عنصر آهن در این بخش از پولیه حرکت را می‌توان به وجود کانی‌های کربناته حاوی آهن از جمله سیدریت ($FeCO_3$) که به صورت اسفرولیت در واحدهای آهکی دیده می‌شود و همچنین به بالا بودن میزان درزه‌ها و شکستگی‌ها در این بخش از پولیه به افزایش تأثیر آب‌های جوی بر روی این واحد و افزایش دیاژنز متئوریک نسبت داد. از طرف دیگر، میزان عنصر آهن در قسمت غربی و جنوبی پولیه در محل رخمون واحد J_{mz3} سازند مزدوران بالاتر از قسمت شمالی در محل رخمون واحد J_{mz2} می‌باشد. علت اصلی این مسئله را می‌توان به وجود کانی‌های آهن‌دار در واحد J_{mz3} مربوط دانست. میزان عنصر آهن در واحد J_{mz2} سازند مزدوران که قسمت شمالی پولیه را پوشانده کمتر از سایر بخش‌ها

بخش از پولیه است. عناصر آهن و منگنز به خاطر اینکه منشا یکسانی دارند و مشابه به هم هستند می‌توانند وارد شبکه کربنات‌ها شوند [۱۷]. افزایش تمرکز بالای دو عنصر آهن و منگنز می‌تواند علاوه بر ضریب توزیع آن‌ها در ارتباط با تأثیر آب‌های جوی با میزان Mn و Fe بالاتر باشد [۶ و ۱۶]. همچنین نهشته‌های کربنات‌ها دارای میزان Mn بالاتر در واحد J_{mz1} که نسبت به واحدهای دیگر قدیمی‌تر است، می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر بیشتر فرآیندهای دیاژنتیکی و در نتیجه افزایش Mn نسبت به سایر واحدها باشد. در طی دیاژنز سنگ‌های کربنات‌ها و انحلال و تبدیل کانی‌های کلسیت و آراگونیت با منیزیم بالا به کانی کلسیت کم منیزیم مقدار Sr کاهش یافته و بالعکس تمرکز عنصر Mn در نمونه‌ها بالا می‌رود. همچنین فرآیند فوق سبب پایین آمدن نسبت Sr/Mn می‌شود [۱۵ و ۵]. میزان Sr و Na می‌تواند توسط ضریب توزیع و تمرکز پایین آن در محلول‌های متئوریک کنترل شود [۱۵]. از این رو ترسیم نمودار Sr/Mn در مقابل Mn می‌تواند به عنوان معیاری برای تخمین انحلال واحدهای آهکی و توسعه پدیده‌های ژئومورفولوژیک کارستی قرار بگیرد [۱۱]. توزیع نسبت Sr/Mn (شکل ۳-و) در پولیه حرکت بسیار متغیر است. نسبت Sr/Mn در پولیه حرکت از سمت شرق پولیه واحد J_{mz1} سازند مزدوران به سمت غرب پولیه واحد J_{mz2} افزایش می‌یابد. نسبت Sr/Mn در قسمت‌هایی که تمرکز گسل‌ها و درزه‌های تکتونیکی افزایش یافته است کاهش نمایش می‌دهد. رسم نمودار Sr/Ca در برابر Mn نمونه‌های مورد مطالعه نشان دهنده یک سیستم دیاژنتیکی نیمه بسته تا باز در منطقه است (شکل ۴) [۶]. همچنین نسبت Sr/Mn در مقابل Mn شکل ۵ در نمونه‌های متعلق به سازند آهکی مزدوران نشان دهنده تأثیر فرآیندهای دیاژنتیکی بر این واحدهای آهک می‌باشد [۱۳]

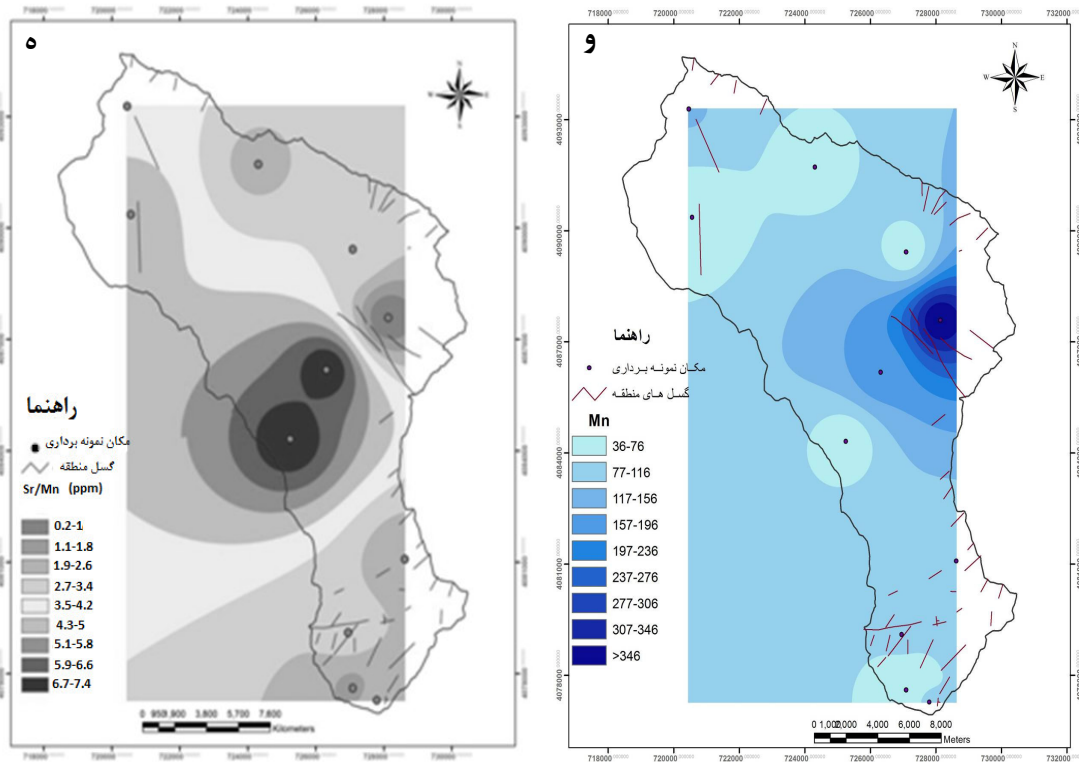
است. میزان عنصر Fe در خروجی پولیه حرکت و در رسوبات آبرفتی ۷/۵۰ پی‌پی‌ام و بالاتر از متوسط میزان این عنصر در پولیه ۲/۸۴۱ پی‌پی‌ام و در واحدهای آهکی سازند مزدوران در سرتاسر کپه داغ ۱/۱۹۱ پی‌پی‌ام است [۱]. با توجه به ارتفاع پایین‌تر و شیب کم‌تر از ۲٪ این بخش از پولیه نسبت به سایر بخش‌ها که نقطه خروجی آبراه‌ها نیز محسوب می‌شود، این احتمال را به وجود می‌آورد که Fe انحلال یافته در واحدهای آهکی بالادست پولیه به دلیل کاهش شیب زمین در خروجی پولیه فرصت نسبتاً بیشتری را برای واکنش با آبرفت و رسوب Fe دارد. این مسئله این احتمال را تقویت می‌کند که خروجی پولیه‌های کارستی با توجه به شیب کم زمین و همچنین ساختار رسوبات در آن مناطق می‌تواند به عنوان تله ژئوشیمی عمل کند. میزان عنصر Mn یکی دیگر از عناصری که در طی دیاژنز متئوریک در نمونه‌های مورد مطالعه افزایش می‌یابد در نمونه‌ها بین ۳۶ تا ۳۷۰ پی‌پی‌ام متغیر و متوسط آن ۱۰۲ پی‌پی‌ام است. مقدار Mn در نمونه‌های آراگونیتی در دریا‌های گرم و کم عمق بسیار کمتر (۲۰ پی‌پی‌ام) از نمونه‌های مورد مطالعه و نمونه‌های متعلق به مناطق معتدله عهد حاضر (۳۰۰ پی‌پی‌ام) می‌باشد که علت آن را با توجه به ضریب توزیع نسبتاً بالای Mn حدود ۱۵ در آب‌های جوی می‌توان به افزایش دیاژنز متئوریک در نمونه‌های عهد حاضر نسبت داد [۱۲]. تمرکز اولیه عنصر Mn در سازند مزدوران با توجه به مینرالوژی آراگونیتی ابتدایی آن و سرعت رسوب‌گذاری بالا در ابتدا پایین بوده است ولی به خاطر فرآیند دیاژنز متئوریک در طول زمان افزایش یافته است. پراکنش میزان Mn (شکل ۳-ه) در پولیه حرکت به این صورت است که میزان Mn در واحد J_{mz1} سازند مزدوران در شرق پولیه حرکت که آهک‌های دولومیتی سستبر لایه با درز و شکاف‌های فراوان‌تر نسبت به سایر بخش‌های حوضه وجود دارد، بیش‌تر از سایر نقاط است که لازم به ذکر است که این افزایش مربوط به بالاتر بودن دیاژنز متئوریک در این

جدول ۳. میزان عناصر شیمیایی مورد مطالعه و نسبت Sr/Mn در پولیه حرکت.

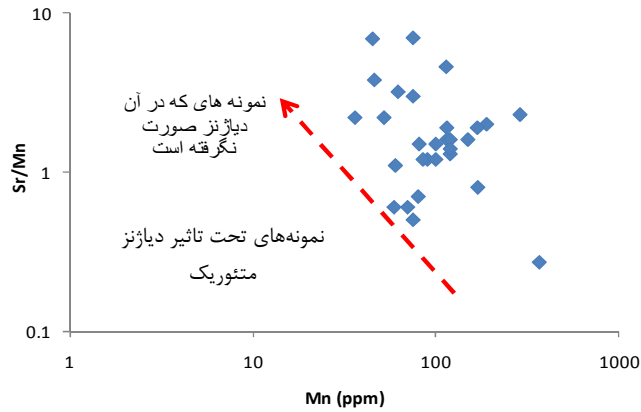
عنصر	میزان عناصر شیمیایی بر حسب (ppm)					
	Ca	Mg	Sr	Mn	Fe	Sr/Mn
Max	۳۹۰۰۰۰	۸۵۰۰	۵۷۵	۳۷۰	۷۵۰۰	۲/۷
Min	۱۲۰۰۰۰	۱۹۰۰	۱۰۰	۳۶	۲۳۵	۱/۵
Average	۲۴۸۸۹۷	۳۷۱۸	۲۵۴	۱۰۲	۲۸۴۱	۱/۹



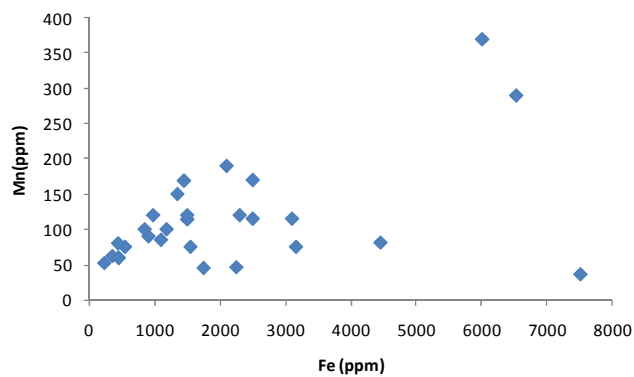
شکل ۳. الف) پراکنش Ca، ب) Mg، ج) Sr، د) Fe در پولیه حرکت.



ادامه شکل ۳. (و) Sr/Mn در پولیه حرکت.



شکل ۴. نمودار Sr/Mn در مقابل Mn نمونه‌های پولیه حرکت.



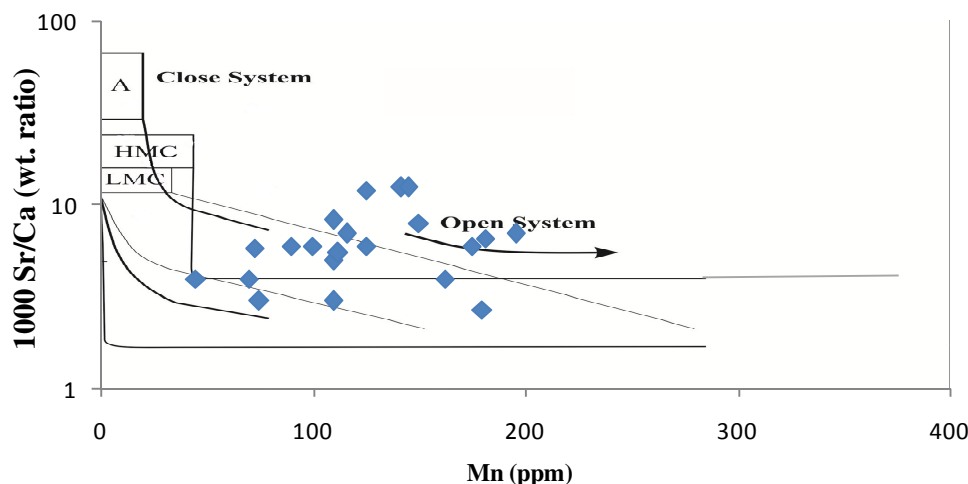
شکل ۵. نمودار Fe در مقابل Mn در نمونه‌های مورد مطالعه در پولیه حرکت.

مکان‌های مستعد برای افزایش میزان عناصری که در فاکتور اول دارای اهمیت هستند را نمایش می‌دهد، می‌تواند تا اندازه‌های نشان‌دهنده نقشه پراکنش پتانسیل سطحی عناصری از جمله Fe, Mn, Ni, Zn و.. باشد. از طرفی در مولفه ۲ مورد مطالعه که در حدود ۱۸٪ از واریانس کل داده‌ها را تشکیل می‌دهد و نشان دهنده ارتباط مستقیم و قوی بین Sr و نسبت Sr/Mn با این مولفه است و بیان کننده عدم توسعه دیاژنز متئوریک و افزایش نسبی میزان Sr و نسبت Sr/Mn در برخی از نمونه‌ها است. از طرفی نقشه نشانه‌های عاملی (Factor Scores) (شکل ۷ ب) برای مولفه ۲ مکان‌هایی را نمایش می‌دهد که علاوه بر سیستم دیاژنتیکی نیمه بسته تا باز تأثیر دیاژنز متئوریک در برخی از مکان‌های پولیه حرکت کمتر بوده است.

مطالعه توزیع پراکنش عناصر شیمیایی با استفاده از فرآیند تحلیل عاملی

انجام فرآیند تحلیل عاملی در نرم‌افزار SPSS بر روی داده‌های ژئوشیمیایی نشان‌دهنده این موضوع است که ۲ فاکتور اصلی ژئوشیمی پولیه حرکت را تحت کنترل دارد جدول (۴). فاکتور ۱ که تقریباً ۶۶/۴٪ از واریانس کل را نمایش می‌دهد، نشان‌دهنده ارتباط قوی بین عناصر Fe, Mg, Ca و Mn است که نشان‌دهنده اهمیت تأثیر فرآیند دیاژنز متئوریک بر نمونه‌های مورد مطالعه است. در نمونه‌های مورد مطالعه افزایش دیاژنز متئوریک سبب افزایش همزمان میزان عناصر Fe با Mn در نمونه‌ها شکل (۶) می‌شود.

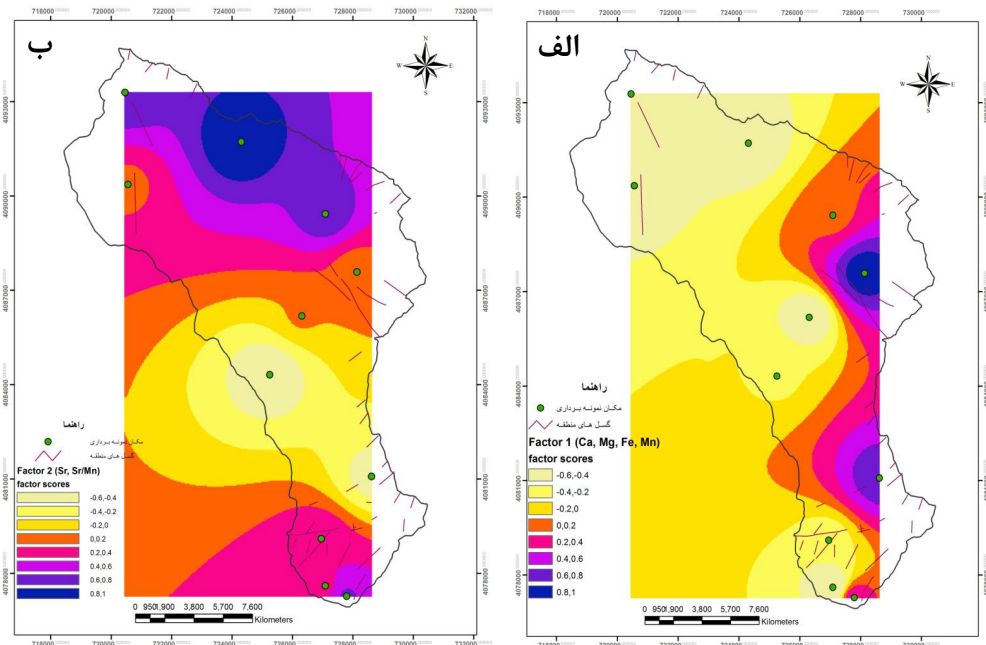
شکل (۷ الف) نیز نقشه نشانه‌های عاملی Factor Score (map) مکان‌هایی از پولیه را نشان می‌دهد که فاکتور اول در آن نقش اساسی دارد. نقشه فوق از آن جهت که



شکل ۶. سیستم دیاژنتیکی سنگ‌های کربناته مورد مطالعه (اقتباس از [۶]).

جدول ۴. فاکتورهای اصلی در فرآیند تحلیل عاملی داده‌های مورد مطالعه در پولیه حرکت.

پارامتر	فاکتور ۱	فاکتور ۲
Ca	۰/۹۰۹	-۰/۰۱۳
Mg	۰/۸۰۲	-۰/۵۵۳
Sr	-۰/۱۵۳	۰/۸۱۳
Fe	۰/۸۹۰	-۰/۳۱۰
Mn	۰/۸۳۰	-۰/۳۸۲
Sr/Mn	-۰/۲۳۸	۰/۹۰۶



شکل ۷. نقشه Factor Score (الف) مولفه اول و (ب) مولفه دوم مورد مطالعه در پولیه حرکت.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مطالعه داده‌های ژئوشیمیایی (Ca, Mg, Fe, Mn, Sr) و نسبت (Sr/Mn) در نمونه‌های متعلق به پولیه حرکت و انجام فرآیند تحلیل عاملی بر روی این داده‌ها نشان دهنده این موضوع است که دو فاکتور اصلی توسعه فرآیند دیاژنز متئوریک و عدم توسعه آن ژئوشیمی واحدهای مورد مطالعه در پولیه حرکت را تحت کنترل دارد. این تأثیر با کاهش میزان Sr و نسبت Sr/Mn و افزایش میزان Fe و Mn تأیید می‌شود. از طرفی رسم نقشه‌های پراکندگی (Ca, Mg, Fe, Mn, Sr)، نسبت (Sr/Mn) و نقشه نشانه‌های عاملی (Factor Score map) در پولیه‌ها نشان دهنده مکان‌هایی با پتانسیل سطحی بالا و تله‌های ژئوشیمیایی برای عناصری از جمله Fe و Ni در پولیه‌ها است. با توجه به پژوهش انجام شده پیشنهاد می‌شود براساس ژئومورفولوژی خاص پولیه‌های کارستی که قابلیت تبدیل شدن به تله‌های ژئوشیمیایی را برای تجمع عناصری از قبیل Fe, Mn, Zn و Ni دارند، مطالعه جامع‌تری در منطقه با جمع‌آوری نمونه‌های بیش‌تر و اندازه‌گیری عناصری از قبیل Ni و Zn صورت گیرد.

تشکر و قدردانی

از زحمات آقای عبدی دانشجوی دکتری زمین‌شناسی گرایش رسوب‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد که با راهنمایی‌های خود به بالابردن کیفیت پژوهش کمک زیادی کردند و همچنین شرکت مراعات آبخیزداری استان خراسان رضوی که لایه‌های رقومی مربوط به dem منطقه و همچنین نقشه زمین‌شناسی منطقه را برای انجام این تحقیق در اختیار قرار دادند کمال تشکر را داریم.

منابع

- [۱] آدابی، م (۱۳۸۳) ژئوشیمی رسوبی، تهران: انتشارات آراین زمین.
- [۲] ایمانی شهمیری، خ (۱۳۹۰) رسوب‌شناسی عضو ورسک سازند الیکا (تریاس) در منطقه شهمیرزاد با تأکید بر فرآیند کارستی شدن (پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی گرایش رسوب‌شناسی). گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد.
- [۳] درویش‌زاده، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، تهران: انتشارات امیرکبیر.
- [۴] ناصری، ح (۱۳۷۰) مطالعه هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی حوضه آبریز سد درودزن (پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی). گروه زمین‌شناسی دانشگاه شیراز.

- [17] Vincent, O., Petit, C., Garcia, J. & Redde, M., (2006). Rhine flood deposits recorded in the Gallo-Roman site of Odenburg (Haut-Rhine, France). *Quaternary International* 150, 28-40.
- [18] Waele, J., Plan L. & Audra, P (2009) Recent development in surface and sub-surface karst geomorphology: An introduction. *Geomorphology Journal* 106, 1-8.
- [5] Aghaei, A., Mahboubi, A., Moussavi-Harami, R., Chakrapani, G.J., Nadjafi, M., (in press). Carbonate diagenesis of the Upper Jurassic succession (Oxfordian-Kimmeridgian) in western Binalud (Eastern Alborz , NE Iran), *Journal of the Geological Society of India*.
- [6] Brand, U and Veizer, J (1980) Chemical diagenesis of the multicomponent carbonate system-1: trace elements. *J. Sediment Petrol.* 50, 1219–1236.
- [7] Cicero, A and Lohmann, K (2001) Sr/Mg variation during Rock-Water interaction: implications for secular changes in the elemental chemistry of the ancient seawater. *Geochemical et Cosmochimica Acta* 65, 741-761.
- [8] Davis, J.C (1986) *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley, New York.
- [9] Dillon, W., and Goldstein, M (1984) *Multivariate analysis: methods and applications*. John Wiley, New York.
- [10] La Moreaux, P.E (1991) *History of Karst Hydrogeological studies: Proceeding of the national Conference on Environmental Changes in Karst Areas*. Padova, Italy.
- [11] Rao, C.P (1990) Petrography, trace elements and Oxygen and Carbon isotopes of Gordon Group carbonates (Ordovician), Florentine Valley, Tasmania, Australia. *Sedimentary Geology* 66, 83-97
- [12] Rao, C.P., & Adabi, M.h (1992) Carbonate minerals, major and minor elements and Oxygen and Carbon isotopes and their variations in water depth in cool, temperate carbonates. *Geo.* 103, 249-272.
- [13] Rao, C.P (1993) Carbonate minerals, Oxygen and Carbon isotopes in Modern temperate bryozoa, eastern Tasmania, Australia., *Sedimentary Geology* 88, 123-135
- [14] Prohic, E (1998) Geochemical characterization of a karst polje- an example from Sinjsko polje, Croatia. *Environmental Geology* 33, 63-273
- [15] Mahboubi, A, Moussavi-Harami, R, Aghaei, A, Carpenter, S.J and Collins, L.B (2010) Petrographical and geochemical evidences for paragenetic sequence interpretation of diagenesis in mixed siliciclastic-carbonate sediments: Mozduran Formation (Upper Jurassic), south of Agh-Darband area, NE Iran. *Carbonates and Evaporites* 25, 231–246
- [16] Pingitore, N.E., Eastman, M.P., Sandidge, M., Oden, K and Freiha, B (1988) The coprecipitation of manganese (II) with calcite, an experimental study. *Mar. Chem.* 25, 107–120